

УДК 669.3:539.89:539.25

**Д. Н. Абдуллина^{*}, И. В. Хомская, В. И. Зельдович, Н. Ю. Фролова,
А. Э. Хейфец**

Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

**abdullina@imp.uran.ru*

Научный руководитель — д-р техн. наук И. В. Хомская

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ Cu–Cr, Cu–Zr И Cu–Cr–Zr ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И СТАРЕНИИ

Исследовали влияние высокоскоростной деформации методом динамического канально-углового прессования и последующего отжига на структурные изменения, прочностные свойства и электропроводность дисперсионно-твердеющих сплавов Cu–Zr, Cu–Cr и Cu–Cr–Zr.

Ключевые слова: медные сплавы, субмикроструктурная структура, высокоскоростное прессование, механические свойства, электропроводность

D. N. Abdullina, I. V. Khomskaya, V. I. Zel'dovich, N. Yu. Frolova, A. E. Kheifets

EVOLUTION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE LOW- ALLOYED Cu–Cr, Cu–Zr AND Cu–Cr–Zr ALLOYS UNDER HIGH STRAIN RATE DEFORMATION AND AGING

The effect of high strain rate deformation by dynamic channel-angular pressing and subsequent annealing on structural changes, strength properties and electrical conductivity of dispersion-hardening alloys based on Cu–Zr, Cu–Cr and Cu–Cr–Zr systems was investigated.

Key words: copper alloys, submicrocrystalline structure, high strain rate pressing, mechanical properties, electrical conductivity

Методами металлографического, электронно-микроскопического анализа и дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) исследована эволюция структуры сплавов Cu–Zr, Cu–Cr

и Cu—Cr—Zr, легированных микродобавками Cr (0,09–0,14 мас. %) и Zr (0,03–0,10 мас. %) при динамическом канально-угловом прессовании (ДКУП). Метод ДКУП, разработанный в РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск (Патент № 2283717 РФ, 2006 г.), позволяет деформировать материалы со скоростью 10^5 с^{-1} , что на пять порядков больше чем при равноканальном угловом прессовании (РКУП). При ДКУП на структуру материала оказывают влияние высокоскоростная деформация простого сдвига, ударно-волновая деформация сжатия и температура. В исходном закаленном крупнокристаллическом (КК) состоянии размер зерна сплавов составлял 200–400 мкм. После ДКУП в сплавах формируется субмикрокриталлическая (СМК) структура, состоящая из зерен-субзерен размером 0,2–0,3 мкм (рис. 1, а). На границах и внутри отдельных кристаллитов видны наноразмерные (5 нм) выделения частиц вторых фаз (показаны стрелками на рис. 1, а). При отжиге (старении) при 350–400 °С в СМК-структуре происходит выделение наноразмерных (5–10 нм) частиц Cu_5Zr . Наночастицы Cu_5Zr , выделяясь на дислокациях и границах субзерен (показаны стрелками на рис. 1, б) способствуют их закреплению и уменьшению подвижности. В результате замедляется процесс образования центров рекристаллизации, требующий перестройки дислокационной структуры.



Рис. 1. СМК-структура сплавов Cu—0,09 мас. %Cr—0,08 мас. % Zr:

а — после ДКУП (темнопольное изображение в рефлексе 002_α);

б — после ДКУП + отжига (старения) при 400 °С
(светлопольное изображение)

При повышении температуры отжига до 500–700 °С в сплавах формируется структура с размером зерна 1–5 мкм, содержащая большое количество наночастиц Cr и Cu_5Zr . Микротвердость сплава в исходном закаленном КК состоянии равна 680 МПа (рис. 2, а, кривая 1). ДКУП повышает микротвердость сплава до 1600 МПа, то есть в 2,4 раза

по сравнению с КК состоянием (рис. 2, а, кривые 1 и 2), что обусловлено существенным измельчением структуры и частичным деформационным старением. Рост микротвердости до 1700–1780 МПа при 350–450 °С связан с процессами распада твердого раствора. Нагрев до 550–600 °С приводит к снижению микротвердости (рис. 2, а, кривая 2), что обусловлено развитием процесса рекристаллизации. Представляло интерес исследовать свойства сплава с СМК-структурой, полученной ДКУП после режимов старения, продемонстрировавших наилучшую микротвердость. Результаты представлены в таблице. Видно, что ДКУП заметно в 2,6–3,3 раза повышает прочностные свойства сплава, что обусловлено измельчением структуры до СМК-состояния. Еще более значительно в 2,8–5,1 раза возрастают прочностные свойства СМК-сплава после старения при 400–450 °С, что связано с развитием процессов распада твердого раствора с выделением наночастиц Cr и Cu₅Zr фаз. Показано, что в результате комбинированной обработки: ДКУП + 400 °С, 1 ч, можно получить СМК-сплав с высокой твердостью (1780 МПа) и хорошей прочностью ($\sigma_B = 542$ МПа, $\sigma_{0,2} = 464$ МПа) при сохранении удовлетворительной пластичности.

Таблица

Механические свойства сплава Cu–0,14 мас. %Cr–0,04 мас. % Zr
после различных обработок

Показатели	Режимы обработки					
	Закалка 1000 °С	Закалка+ старение 450 °С, 1 ч	ДКУП	ДКУП+ 400 °С, 1 ч	ДКУП+ 400 °С, 4 ч	ДКУП+ 450 °С, 1ч
$\sigma_{0,2}$ МПа	94	139	312	464	464	477
σ_B МПа	196	237	507	542	536	520
δ , %	37	18	10	10	13	11

На примере сплавов Cu–0,1 мас. %Cr и Cu–0,03 мас. %Zr изучено влияние дисперсности СМК структуры, полученной при ДКУП, на сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению. Показано, что ДКУП сплавов, приводящее к измельчению кристаллитов от 300 мкм до 0,2–0,4 мкм, увеличивает в 1,9–2,8 раза динамический предел упругости и динамический предел текучести, и в 1,4 раза — динамическую (откольную) прочность, по сравнению с исходным КК состоянием.

Электропроводность сплава Cu–0,14 мас. %Cr–0,04 мас. %Zr в закаленном КК состоянии составляет 40 % IACS (рис. 2, б, кривая 1). ДКУП повышает электропроводность сплава (кривые 1 и 2 на рис. 2, б), что связано с частичным распадом пересыщенного α -твердого раствора меди в процессе ДКУП. При нагреве до 350–500 °С электропроводность закаленного сплава возрастает от 43 до 70 % IACS (рис. 2, б, кривая 1), что обусловлено распадом пересыщенного α -твердого раствора меди.

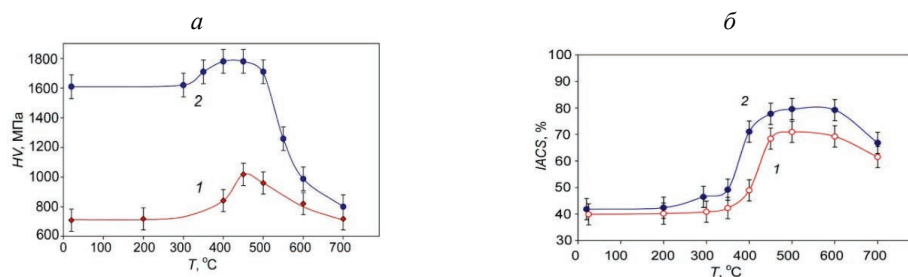


Рис. 2. Влияние температуры старения на микротвердость (а) и электропроводность (б) сплава Cu–0,14 мас. %Cr–0,04 мас. %Zr после закалки от 1000 °С (1) и ДКУП (2)

При нагреве СМК-сплава, полученного ДКУП, электропроводность не изменяется до 200 °С, а затем в интервале 200–350 °С начинает увеличиваться (рис. 2, б, кривая 2), что связано с процессами возврата, и существенно возрастает (от 48 до 80 % IACS) в интервале 350–600 °С, что обусловлено распадом α -твердого раствора с выделением наноразмерных частиц вторых фаз.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № АААА-А18–118020190116–6 и проекта № 18–10–2-39 программы УрО РАН.